

УДК 551.510

ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ПАКЕТЫ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

© 2012 г. Т. В. Скороход, Г. В. Лизунов

Институт космических исследований НАН Украины и НКА Украины, г. Киев

e-mail: tayna_83@ukr.net; georgii.lizunov@gmail.com

Поступила в редакцию 05.10.2010 г.

После доработки 07.02.2011 г.

По данным масс-спектрометрических измерений на спутнике Dynamics Explorer 2 исследовано распределение среднemasштабных акустико-гравитационных волн (АГВ) на высотах F -области ионосферы. Показано, что планетарное поле АГВ содержит регулярную и спорадическую составляющие. В регулярном распределении АГВ выделяются активные полярные области, где ионосфера сильно возмущена, и относительно спокойная экваториальная зона. Спорадические АГВ представляют собой изолированные, локализованные в пространстве волновые пакеты, выделяющиеся на фоне регулярного распределения волнового поля. Составлен каталог наблюдений таких пакетов за период январь–февраль 1983 г. и представлен статистический анализ их связи с землетрясениями.

1. ВВЕДЕНИЕ

Акустико-гравитационные волны (АГВ) играют важную роль в динамике ионосферы [Hines, 1960]. Систематическое изучение этих волн сталкивается с многочисленными трудностями, наибольшей из которых, по-видимому, является сложность регистрации АГВ на ионосферных высотах. В литературе, как правило, приводятся описания только отдельных наиболее выразительных событий, обычно возмущений большой амплитуды, когда волновые формы АГВ различимы на экспериментальных эпюрах “на глаз”, и параметры АГВ можно визуально оценивать без специальной математической обработки [Francis, 1975; Фаткуллин и др., 1990; Maug et al., 1990; Hocke and Schlegel, 1996]. Являясь скорее иллюстративными, чем репрезентативными, такие наблюдения не создают цельного представления о волновой активности ионосферы: пространственно-временном распределении АГВ, характерных параметрах волн, зависимости от гелио- и геофизических условий и т.д.

По сегодняшний день остается малоизученной связь наблюдаемых в ионосфере возмущений с потоками энергии снизу. Многочисленные данные свидетельствуют, что источниками ионосферных АГВ могут служить ураганы, цунами, землетрясения и вероятно процессы подготовки землетрясений, старты ракет, ядерные и химические взрывы и т.д. Но только в немногих работах на эту тему указанные источники ионосферных вариаций были верифицированы или априори известны (как при регистрации отклика ионосферы на ядерные взрывы), в большинстве же

случаев связь космических и приземных процессов только декларировалась.

В украинском Институте космических исследований в течение ряда лет ведется обработка спутниковых измерений АГВ, ставящая целью выявление и количественный анализ волн произвольной (в том числе малой) амплитуды. Цель данной работы состоит в изучении волнового поля АГВ в ионосфере, как оно есть, безотносительно к вопросу о возможных источниках АГВ. Полученные таким образом результаты создадут основу для последующего статистически обоснованного изучения ионосферного отклика на воздействия сверху и снизу. По результатам измерений более чем на двухстах орбитальных витках спутника Dynamics Explorer 2 в данной работе составлен каталог волновых структур АГВ, который будет пополняться по мере дальнейшей обработки экспериментальных данных. В работе продемонстрировано применение создаваемого каталога для анализа связи ионосферных АГВ с землетрясениями.

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Прямые измерения параметров нейтральной атмосферы на ионосферных высотах немногочисленны. Основной объем результатов получен на серии спутников Atmosphere Explorer и спутнике Dynamics Explorer 2 (далее DE 2) в 70-х и начале 80-х гг. XX столетия. В настоящее время эти результаты выставлены на веб-ресурсе “National Space Science Data Center” (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/atmoweb>) в открытом доступе.

Данная работа посвящена анализу масс-спектрометрических измерений на ИСЗ DE 2 (экспе-

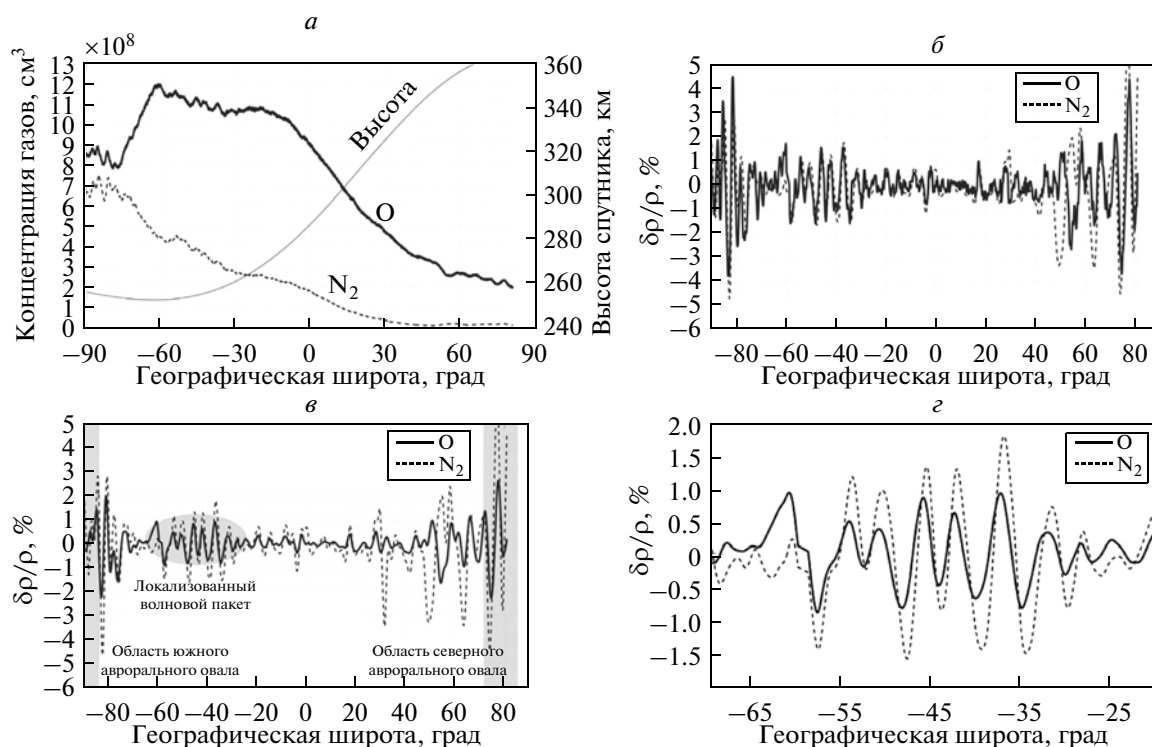


Рис. 1. *a* – Орбитальный ход концентрации атомарного кислорода (сплошная жирная кривая), молекулярного азота (штриховая линия) и высоты спутника DE 2 (сплошная линия) на витке 8296; *б* – отфильтрованные в диапазоне горизонтальных длин волн 80–800 км вариации $\delta[O]/[O]$ (сплошная кривая) и $\delta[N_2]/[N_2]$ (штриховая кривая); *в* – те же волновые формы в диапазоне горизонтальных длин волн 400–700 км, на рисунке выделены: волновой пакет АГВ и рассчитанные положения авроральных зон; *г* – увеличенный фрагмент предыдущего рисунка.

римент NACS), запущенном в 1981 г. на солнечно-синхронную орбиту с перигеем 309 км, апогеем 1012 км и наклоном 90° [Kramer, 2002]. За более чем два года функционирования спутника его орбита снижалась, последний месяц (февраль 1983 г.) наблюдения велись на почти циркулярной орбите с высотой 240–340 км. При орбитальном наклоне 90° движение DE 2 происходило почти вдоль меридиана, поэтому ход измеряемых параметров ниже показан как функция географической широты спутника.

Процедуру обработки измерений, которая велась по методике [Федоренко, 2008], иллюстрируют рисунки 1*a*, 1*б*, 1*в*, 1*г*. Рисунок 1*a* является непосредственной визуализацией исходных данных, размещенных на веб-ресурсе проекта; на этом рисунке представлен ход концентраций основных составляющих атмосферы [O] и [N₂] вдоль витка спутника. Дальнейшая математическая обработка состояла в полосовой фильтрации данных в диапазоне среднемасштабных возмущений. Вначале производилась широкополосная фильтрация, затем, в случае обнаружения квазигармонических вариаций, полоса фильтра стягивалась к несущей частоте, чтобы очистить волновую форму от высокочастотных шумов (в основном приборного происхождения) и низко-

частотного тренда (отображающего глобальный высотный и широтный ход атмосферных параметров). На рисунке 1*б* представлены колебания плотности $\delta[N_2]/[N_2]$ и $\delta[O]/[O]$, выделенные из эпюры на рис. 1*a* в области длин волн $\lambda_x = 80\text{--}800$ км (здесь λ_x – компонента длины волны вдоль траектории спутника). После сужения полосы фильтра до $\lambda_x = 400\text{--}700$ км из волновой формы на рис. 1*б* получается “очищенный” сигнал, представленный на рис. 1*в*. Отметим, что сужение окна фильтрации уменьшает интенсивность, но не искажает длины и фазы волн.

Тестом, удостоверяющим, что полученные таким образом вариации есть АГВ, служит соответствие измеренных характеристик сигнала теории АГВ. Так, амплитуды колебаний отдельных газов связаны в АГВ приближенным соотношением [Makhlouf et al., 1990]

$$\frac{\delta\rho_\alpha}{\rho_\alpha} \approx \frac{\gamma H/H_\alpha - 1}{\gamma - 1} \frac{\delta\rho}{\rho}, \quad (1)$$

где $\delta\rho/\rho$ – относительное возмущение плотности атмосферы, $H = \rho/(\partial\rho/\partial z)$ – высота однородной атмосферы, $\delta\rho_\alpha/\rho_\alpha$ – возмущение плотности газа сорта “ α ”; $H_\alpha = k_B T/m_\alpha g$ – высота однородной атмосферы газа сорта “ α ”, γ – показатель адиабаты.



Рис. 2. Распределение АГВ вдоль витка 8332.

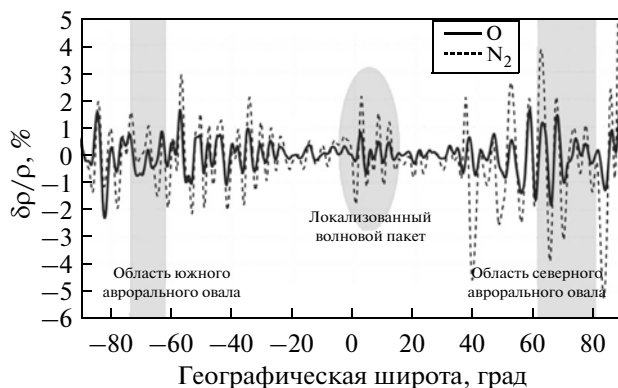


Рис. 3. Распределение АГВ вдоль витка 8137.

Хотя различные газы движутся в АГВ совместно и испытывают одинаковые вариации температуры δT и скорости δV , относительные вариации их плотностей (1) различны [Makhlouf et al., 1990; Лизунов и Федоренко, 2006].

Формула (1) справедлива в приближении $\xi = (2kH)^{-2} = (\lambda/\lambda_g)^2 \ll 1$, где k – волновое число, λ – длина волны, $\lambda_g = 4\pi H$ – характерный пространственный масштаб. Численное значение λ_g в F -области ионосферы составляет ~ 600 км, что превышает всю высоту термосферы Земли и, следовательно, превышает вертикальные длины распространяющихся в термосфере волн: $\lambda_z < \lambda_g$. Таким образом, параметр $\xi < 1$, что обосновывает применение оценки (1) к анализу экспериментальных данных.

В диапазоне высот, где проводились измерения на ИСЗ DE 2, основным атмосферным газом является атомарный кислород, который задает гидродинамические параметры атмосферы: высоту однородной атмосферы $H \approx H_O \approx 40$ км (вычислено по прямым измерениям температуры на ИСЗ DE 2), эффективный показатель адиабаты $\gamma = 5/3$ (как для одноатомного газа) и др. Следующей по концентрации газовой компонентой является молекулярный азот, для которого $H_{N_2} = 0.57H_O$. Согласно (1):

$$\frac{\delta[N_2]}{[N_2]} \approx 3 \frac{\delta[O]}{[O]},$$

что убедительно согласуется с соотношением вариаций плотности газов, выделенных на рис. 1г и трактуемых далее как АГВ.

Такого рода теоретические тесты применялись ко всем волновым формам, полученным в данной работе. На тех витках, где наряду с плотностью регистрировались также температура или скорость газа (по данным эксперимента WATS на борту DE 2), учитывались вариации и этих параметров. Если амплитуды и фазы колебаний заметно расходились с теорией (скажем, вариации $[O]$

и $[N_2]$ происходили скорее в противофазе) или вели себя несогласованно в разных измерительных каналах, то сигнал трактовался как “помеха” (не АГВ) и исключался из рассмотрения.

3. СТРУКТУРА ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

Представленные ниже результаты получены по данным измерений на 265-ти витках ИСЗ DE 2 за период январь–февраль 1983 г.

Хотя поле АГВ непрерывно “дышит”, изменяясь от витка к витку спутника, в планетарном масштабе волновая активность демонстрирует ярко выраженную морфологическую структуру, которую иллюстрируют рисунки 1в, 2, 3. В широтном распределении АГВ выделяются: 1) области полярных шапок, где происходит непрерывная генерация АГВ и где амплитуда АГВ достигает максимальных значений $\delta\rho/\rho \sim 5\text{--}10\%$, 2) средних широт, на которых по мере удаления от авроральных овалов интенсивность АГВ спадает, 3) широт ниже $40\text{--}50^\circ$, где волновая активность достигает минимума $\delta\rho/\rho \sim 0.5\%$, но не исчезает целиком. (Детальный анализ планетарного распределения АГВ представлен в работе [Лизунов, Скороход, 2010]). На этом глобальном фоне спорадически наблюдаются изолированные волновые всплески – локализованные волновые пакеты (ЛВП), примеры которых приведены на рисунках 1в, 3. Хотя ЛВП присутствуют на двух из трех приведенных здесь экспериментальных графиков широтного распределения АГВ, их регистрация является редким событием. На 265-ти витках DE 2, проанализированных в данной работе, выявлено всего 29 ЛВП, все они описаны в таблице. Планетарное распределение ЛВП характеризует рис. 4, где показано пересечение волновых пакетов траекторией спутника.

Наблюдаемые параметры ЛВП следующие:

- выделенная горизонтальная длина волны порядка 550 км;

Каталог наблюдений локализованных волновых пакетов АГВ. В последней колонке указано превышение амплитуды волнового пакета над фоном

№ ЛВП	Дата	UT, час	Местоположение ЛВП	№ витка	$A_{\max}/A_{\text{фон}}$
1	02.01.1983 г.	20:22	110°E, 18–26°N	7830	2
2	05.01.1983 г.	14:88	175°W, 30–35°S	7874	3
3	05.01.1983 г.	14:88	175°W, 7–16°N	7874	5
4	06.01.1983 г.	13:65	157°W, 22–32°S	7889	2
5	06.01.1983 г.	13:65	157°W, 40–50°N	7889	2
6	09.01.1983 г.	08:60	84°W, 15–20°N	7933	5
7	12.01.1983 г.	20:31	100°E, 40–30°S	7988	3
8	13.01.1983 г.	06:91	61°W, 48–40°S	7995	6
9	13.01.1983 г.	13:55	17°E, 30–40°N	8000	5
10	14.01.1983 г.	19:29	112°E, 5–24°N	8019	5
11	21.01.1983 г.	08:61	97°W, 35–27°S	8123	3
12	22.01.1983 г.	05:78	50°W, 37–25°S	8137	5
13	22.01.1983 г.	05:78	50°W, 2–12°N	8137	5
14	24.01.1983 г.	12:31	153°W, 27–33°N	8173	2
15	24.01.1983 г.	06:22	62°W, 50–35°S	8169	5
16	25.01.1983 г.	01:87	2°E, 65–35°S	8182	11
17	25.01.1983 г.	09:59	112°W, 25–15°S	8187	3
18	27.01.1983 г.	15:82	150°E, 52–32°S	8223	10
19	27.01.1983 г.	05:10	45°W, 47–43°S	8216	4
20	28.01.1983 г.	05:36	53°W, 55–45°S	8232	2
21	29.01.1983 г.	08:45	99°W, 52–32°S	8250	6
22	31.01.1983 г.	08:71	105°W, 32–25°S	8282	5
23	01.02.1983 г.	05:69	64°W, 50–35°S	8296	2
24	01.02.1983 г.	17:73	114°E, 45–35°S	8304	9
25	04.02.1983 г.	01:51	25°W, 32–27°S	8341	5
26	07.02.1983 г.	11:92	158°W, 45–35°S	8396	4
27	07.02.1983 г.	05:92	73°W, 50–35°S	8392	5
28	13.02.1983 г.	01:77	166°E, 10–30°N	8486	2
29	15.02.1983 г.	09:47	150°W, 43–27°S	8523	5

– длительность ЛВП в среднем 3–4 цикла колебаний;

– максимальная амплитуда ЛВП $\delta\rho/\rho \sim 3\text{--}5\%$; с уменьшением амплитуды волновые пакеты сливаются с фоном глобального распределения АГВ;

– характеристики ЛВП и частота их появления не обнаруживают корреляции с индексами магнитной активности.

Спорадический характер возникновения ЛВП во времени и по координате, отсутствие заметной связи с авроральной активностью указывают, что именно с этим типом возмущений может быть связан динамический отклик ионосферы на приземные источники энерговыделения, о чем шла речь во Введении. В таком аспекте изучение ЛВП представляет значительный интерес.

4. СВЯЗЬ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

В качестве демонстрации применения каталога волновых возмущений, представленного в таблице, проанализируем связь ЛВП с землетрясениями. Будем интересоваться только самим фактом корреляции этих событий, безотносительно к гипотетическим механизмам сейсмо-ионосферной связи. Параметры землетрясений находим в базе данных (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php).

На рисунке 4 выведены эпицентры землетрясений, произошедших в исследуемый период. Судя по этому рисунку можно предположить, что связь ЛВП с землетрясениями существует (особенно если принять во внимание, что в процессе

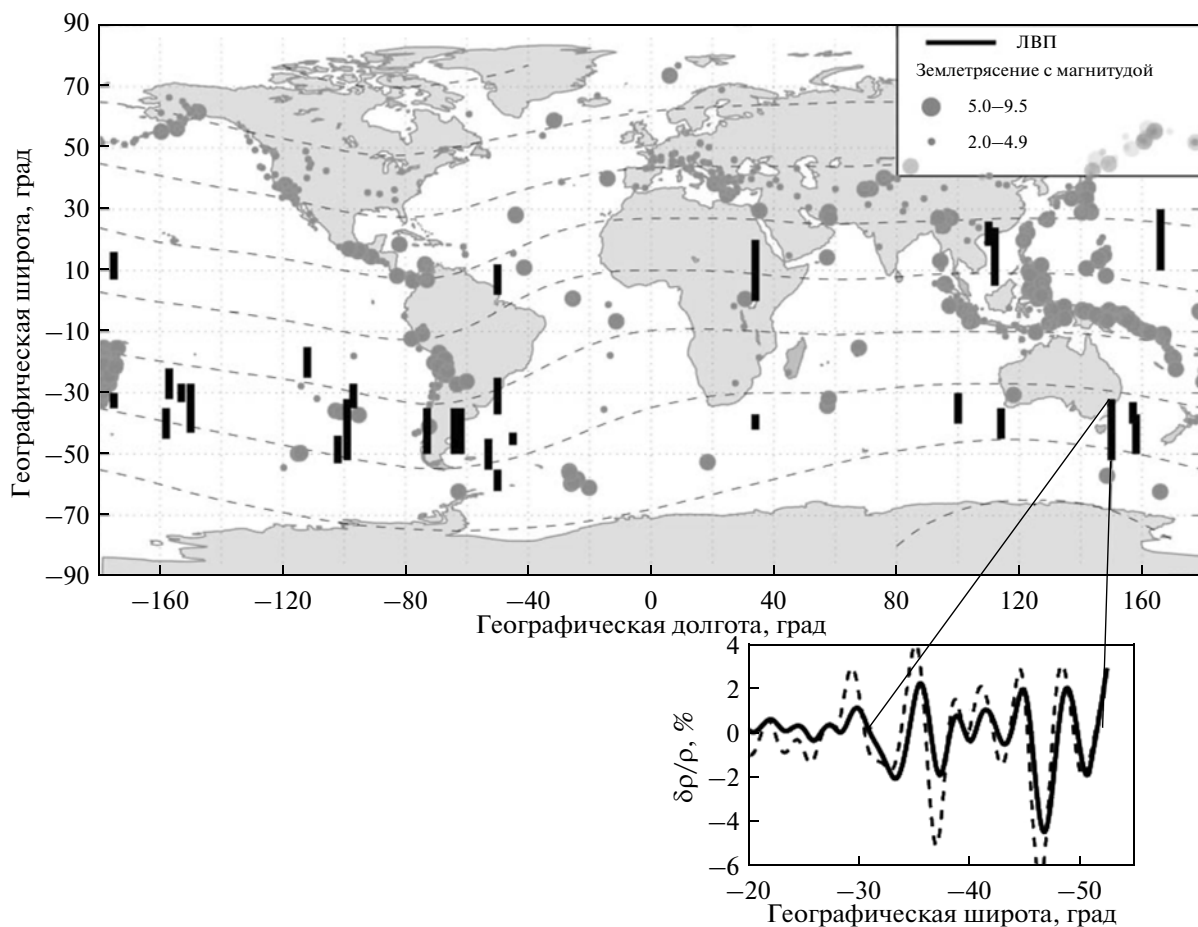


Рис. 4. Географическое распределение ЛВП (сплошные черточки) и эпицентры землетрясений (кружки), происшедших за период наблюдений. На карте штрихами нанесены линии геомагнитной широты.

распространения АГВ смещаются от источника на тысячи км по горизонтали).

Множество землетрясений, могущих служить источниками ЛВП, ограничим интуитивными критериями: 1) рассмотрим только сильные землетрясения с магнитудой $M > 5.0$; 2) глубиной гипоцентра $D < 100$ км; 3) эпицентры которых удалены менее чем на 4500 км от ЛВП и 4) происшедшие в пределах ± 12 ч от момента регистрации ЛВП.

На рисунке 5 представлена причинно-следственная диаграмма, на которой методом наложения эпох все отобранные землетрясения помещены в начало отсчета, а ЛВП показаны по отношению к ним в системе координат “время”–“расстояние”. В области отрицательных времен ЛВП являются предвестниками землетрясений, в области положительных времен – откликами. Показан сверхзвуковой конус, внутри которого связь событий физически невозможна. На рисунке 5, неожиданно для авторов этой работы, выделилась группа предвестников землетрясений (на временах $-8...-4$ ч), в целом же в расположении ЛВП трудно обозначить конкретную законо-

мерность. По нашему убеждению, воздействие землетрясений на ионосферу – слишком сложное физическое явление, чтобы моделировать его с помощью такого ограниченного набора входных

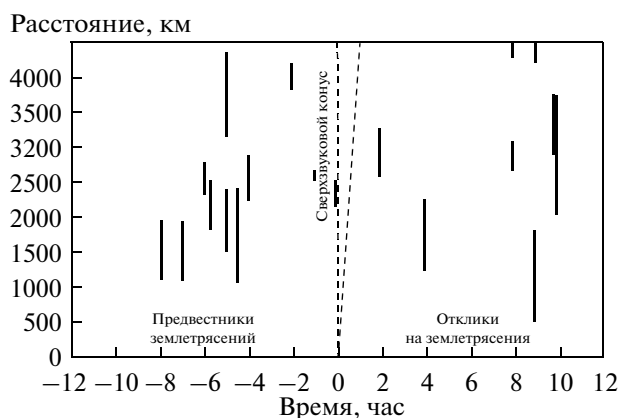


Рис. 5. Диаграмма причинно-следственных связей между землетрясениями (помещены в начало координат) и локализованными волновыми пакетами АГВ.

параметров, как магнитуда, глубина гипоцентра и размер пространственно-временного окна. Физика процесса, которая нам не известна, как бы налагает на рис. 5 маску, выделяющую область распространения сейсмогенных АГВ и отсеивающую “лишние” события. Нарачивая статистику наблюдений ЛВП и перебирая критерии отбора землетрясений, можно попытаться визуализировать эту маску, что явилось бы подсказкой для построения теории сейсмо-ионосферных связей.

5. ВЫВОДЫ

Как видно из представленных в данной работе результатов, волновое поле АГВ содержит регулярную и спорадическую составляющие. Регулярная составляющая генерируется полярными сияниями, причем из областей авроральных овалов АГВ распространяются в область полярных шапок и спускаются в экваториальном направлении до широт $\varphi_0 \sim 40\text{--}50^\circ$. В глобальном распределении АГВ таким образом выделяются активные полярные области, где ионосфера всегда сильно возмущена, и относительно спокойная приэкваториальная зона. При указанном широтном значении φ_0 , зона спокойной ионосферы покрывает $\sim 70\%$, а активных областей $\sim 30\%$ поверхности планеты.

Планетарное распределение АГВ не является стационарным. Мгновенный рельеф волнового поля, очертания границ полярных областей меняются от витка к витку спутника. Регулярность волновой активности состоит в сохранении средних характеристик, коррелирующих с авроральной активностью [Лизунов и Скороход, 2010].

Спорадическая составляющая возникает в виде коротких, состоящих из нескольких циклов колебаний цугов АГВ — локализованных в пространстве волновых пакетов. ЛВП характеризуются умеренной амплитудой (до нескольких процентов относительного возмущения плотности газа), благодаря чему они отчетливо выделяются на фоне волновой активности спокойной зоны, но практически неразличимы в активных полярных областях.

Локализованность спорадических всплесков АГВ, их независимость от гелиофизических факторов, указывают, что именно с ЛВП следует связывать ионосферный отклик на воздействия снизу (а не генерацией среднемасштабных АГВ вообще, как об этом пишут [Francis, 1975, Hocke and Schlegel, 1996]).

Каталог ЛВП, пополняемый по мере обработки новых наблюдений, является статистической основой для изучения связи ионосферных возмущений с конкретными гео- и гелиофизическими процессами. В данной работе проанализирована связь ЛВП с землетрясениями.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.Е. Корепанову и Ф.Л. Дудкину за конструктивную дискуссию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лизунов Г.В., Скороход Т.В. Планетарное распределение среднемасштабных атмосферных гравитационных волн по данным спутниковых измерений // Космічна наука і технологія. Т.16. № 1. С. 36–41. 2010.
- Лизунов Г.В., Федоренко А.К. Генерация атмосферных гравитационных волн солнечным терминатором по данным измерений на спутнике “Atmosphere Explorer-E” // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 11. № 1. С. 49–62. 2006.
- Фаткуллин М.Н., Заруцкая Е.В., Фаткуллина В.А. Глобальные пространственные характеристики среднемасштабных волнообразных неоднородностей на высотах области F ионосферы при различных уровнях геомагнитной активности // Препр. № 41 (926). М.: ИЗМИРАН. 13 с. 1990.
- Федоренко А.К. Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // Космічна наука і технологія. Т. 14. № 5. С. 65–73. 2008.
- Francis S.H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. № 6–7. P. 1011–1054. 1975.
- Hines C.O. Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. V. 38. № 11. P. 1441–1481. 1960.
- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophysicae. V. 14. № 9. P. 917–940. 1996.
- Kramer H.J. Observation of the Earth and its environment: Survey of missions and sensors. Berlin; Heidelberg: Springer. 1510 с. 2002.
- Makhlouf U., Dewan E., Isler J.R., Tuan T.F. On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations // J. Geophys. Res. V.95. № A4. P. 4103–4111. 1990.
- Mayr H.G., Harris I., Herrero F.A., Spencer N.W., Varosi F., Pesnell W.D. Thermospheric gravity waves: observations and interpretation using the transfer function model (TFM) // Space Sci. Rev. V. 54. № 3–4. P. 297–375. 1990.